

土钉支护结构优化设计方法

彭明祥

(广东省电力设计研究院, 广东 广州 510600)

摘要: 基于极限平衡法建立了以工程造价为目标的土钉支护结构优化设计模型, 采用改进复形法求解, 并通过优化后分析进一步揭示了模型参数变化对优化问题的影响。该方法已编制成计算机设计软件, 实际工程应用证明是成功的。

关键词: 土钉支护; 优化设计; 极限平衡法; 改进复形法

中图分类号: TU411

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2006)10-1218-06

作者简介: 彭明祥(1964-), 男, 广东化州人, 高级工程师, 注册岩土工程师, 硕士, 主要从事水工结构和岩土工程的设计研究工作。

Optimum design method of soil nailing structure

PENG Ming-xiang

(Guangdong Electric Power Design Institute, Guangzhou 510600, China)

Abstract: The optimum design model of soil nailing structure was developed based on the limit equilibrium method for optimum construction cost. The solution was found with the improved complex method. The analysis after optimization further illustrated the effect of variation of model parameters on the best solution. The method was developed into design software and it was proven in practical application.

Key words: soil nailing; optimum design; limit equilibrium method; improved complex method

0 前言

土钉支护结构优化设计一直是人们很感兴趣的研究课题, 目前这方面文章不多见, 可应用于实际工程的研究成果就更少。随着土钉支护结构计算方法^[1]的不断改进和完善以及计算机数值分析技术^[2]在工程上的广泛应用, 使得解决这一问题已成为可能。本文基于极限平衡法对土钉支护结构进行整体稳定性分析, 结合现行有关规程^[3-4]及长期工程实践经验, 建立了一个较为完整实用的优化设计模型, 采用改进复形法求解。本文方法已编制成计算机设计软件, 这样只要对优化结果作适当调整并辅以少量的校核验算, 即可得到正式的施工图设计方案, 既简便易行又经济可靠。

1 优化设计模型

1.1 设计变量

在土钉层数 M 事先给定的情况下, 土钉支护结构的设计参数主要有: 土钉钢筋直径 ϕ_i (mm); 土钉水平间距 s_i (mm); 土钉水平倾角 α_i ($^\circ$); 土钉钻孔直径 d_i (mm); 土钉长度 L_i (mm); 土钉竖向间距 h_i (mm); 其中 $i = 1, 2, \dots, M$ 。在实际工程中, 为了施工方便起见,

各层土钉的钢筋直径、水平间距、水平倾角以及钻孔直径等通常保持一致, 而土钉长度则根据计算需要一般各不相同。另外土钉竖向间距一般也相同或相差很小, 由于层数 M 一定, 根据土钉布置的构造要求, 竖向间距已可确定, 故不参与寻优。因此, 土钉支护结构优化设计的设计变量可归结为

$$X = [\phi, s, \alpha, d, L_1, L_2, \dots, L_M]^T, \quad (1)$$

共 $M+4$ 个设计变量。

土钉支护结构的安全可靠性及经济合理性与这些设计变量密切相关。如土钉钢筋直径或钻孔直径过小时, 内部整体稳定性可能得不到满足, 过大则增加工程量和施工难度, 从而增加工程造价; 增大水平间距可降低工程造价, 同时也降低了内部整体稳定性; 减小各层土钉长度可降低工程造价, 同时也降低了内部和外部整体稳定性; 文献[5]分析表明, 内部整体稳定安全系数随着土钉水平倾角的增大起初逐渐增大, 到达峰值后开始逐渐减小, 说明水平倾角过大或过小都不利于结构稳定性。由此可见, 无论对哪个设计变量而言, 都存在一个合理取值问题。

1.2 目标函数

土钉支护结构优化设计的目的是在确保安全的前提下使工程造价最小,即选择工程造价作为目标函数。土钉支护工程造价由以下 3 部分组成:①钻孔注浆费用,主要与钻孔注浆量有关,同时考虑注浆材料、土质情况以及施工条件等因素的影响;②土钉钢筋费用,包括材料费、制作安装费等;③挂网喷射混凝土护面费用,与护面厚度、混凝土强度、网筋含量等因素有关。单位支护面积的工程综合单价可由下式计算:

$$f(X) = \frac{\pi}{4} \frac{L_i}{sb} [p_c(d^2 - \phi^2) + p_s \rho_s \phi^2] + p_t \quad (2)$$

式中 p_c 为土钉钻孔注浆的综合单价 (元/m³); p_s 为土钉钢筋的综合单价 (元/t); p_t 为挂网喷射混凝土护面的综合单价 (元/m²); b 为基坑设计剖面从坡顶至坡脚的坡面线长度 (m); 钢筋材料密度 $\rho_s = 7.85$ t/m³。

由式 (2) 可见,目标函数 $f(X)$ 是关于设计变量 ϕ 、 s 、 d 和 L_i ($i = 1, 2, \dots, M$) 的显式函数,而与水平倾角 α 无关。另外,当 ϕ 、 d 设为定值而不参与优化时,式 (2) 目标函数同以单位支护面积的土钉长度作为目标函数是完全等价的。

1.3 约束条件

包括土钉支护结构的内部整体稳定约束、外部整体稳定约束和设计变量界限约束三部分,这些约束条件反映了对土钉支护结构安全性和设计变量合理取值的设计要求。

(1) 内部整体稳定约束

$$F_{si} \geq [F_s] \quad , \quad i = 1, 2, \dots, M+1 \quad (3)$$

式中 F_{si} 为每次分层开挖时边坡的内部整体稳定安全系数,按文献[1]方法计算; $[F_s]$ 为内部整体稳定安全系数容许值。

(2) 外部整体稳定约束

$$K_q \geq [K_q] \quad , \quad (4)$$

$$K_h \geq [K_h] \quad , \quad (5)$$

$$K_c \geq [K_c] \quad , \quad (6)$$

$$K_j \geq [K_j] \quad , \quad (7)$$

式中 K_q 为土钉墙抗倾覆安全系数; K_h 为土钉墙抗滑安全系数; K_c 为土钉墙地基承载力安全系数; K_j 为土钉墙深层滑动稳定安全系数;均按文献[1]方法计算。 $[K_q]$ 、 $[K_h]$ 、 $[K_c]$ 和 $[K_j]$ 为相应的安全系数容许值。

(3) 设计变量界限约束

$$\underline{X} \leq X \leq \overline{X} \quad , \quad (8)$$

式中 $\overline{X}$ 、 $\underline{X}$ 分别为设计变量的上限值和下限值。

式 (3) ~ (8) 构成了优化问题设计空间的可行

域 Ω , 土钉支护结构优化设计的数学模型可归结为:在可行域 Ω 内寻找一组设计变量 X^* , 使目标函数 $f(X)$ 最小, 即

$$X^* : \min_{X \in \Omega} f(X) \quad (9)$$

2 优化计算方法

由于约束函数的非光滑性,而且大多为隐式函数,因此优化计算方法选用改进复形法,即在普通复形法的基础上采取了以下多项改进措施,因而其优化效率大为提高。

2.1 加权形心

普通复形法的形心是指除劣点外其余各顶点的几何中心,劣点至形心的连线被视为目标函数的下降方向,是构成复形法算法的基础。为使目标函数下降得更快一些,引进与目标函数有关的权系数^[2]

$$\omega_k = \frac{C - f(X_k)}{\sum_{j=1, j \neq h}^p [C - f(X_j)]} \quad , \quad k = 1, 2, \dots, p \quad , \quad k \neq h \quad (10)$$

式中 $p = 2n + 1$ 为复形顶点数; n 为设计变量个数; h 为劣点号; C 为一个较大数,常取二倍劣点目标函数值 $2f(X_h)$, 于是复形的加权形心坐标为

$$X_c = \sum_{k=1, k \neq h}^p \omega_k \cdot X_k \quad (11)$$

可以证明,劣点对加权形心的反射方向是一个既能计及全部复形点信息,又能使目标函数下降得更快的方向,即搜索方向为

$$D = \frac{X_c - X_h}{\|X_c - X_h\|} \quad , \quad (12)$$

沿 D 方向试求新点

$$X^{p+1} = X_c + \beta \lambda D \quad , \quad (13)$$

式中 β 为一调整系数,取决于约束函数的非线性程度及步长 λ 的相对大小,若 X^{p+1} 下降可行则替代劣点重组复形,否则在 X_c 与 X^{p+1} 之间存在极小点或可行点,可由 X_h 、 X_c 、 X^{p+1} 三点作二次曲线拟合求得该点。

2.2 单调性分析确定搜索步长

对于优化问题

$$\min f(X) \quad , \quad X \in E^n \quad , \quad \text{s.t. } g_i(X) \leq 0 \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (14)$$

要确定沿搜索方向 D 上的步长 λ , 为此将这一问题转化为

$$\min f(t)$$

s.t. $g_i(t) \leq 0, \quad i = 1, 2, \dots, m, \quad (15)$

式中 t 为搜索方向 D 上的长度坐标。如果目标函数 $f(t)$ 在可行域上关于 t 单调, 则最优点处至少有一个与 $f(t)$ 相异单调性的不等式约束为作用约束。确定步长的步骤如下: ①计算形心 X_c 处沿 D 方向目标函数和约束函数的方向导数, 找出与目标函数单调性相异的全部约束; ②将约束函数 $g_i(X_c + \lambda_i D)$ 在 X_c 处线性展开, 并令它等于 0, 则有

$$\lambda_i = \frac{-g_i(X_c)}{\nabla g_i^T(X_c)D}, \quad (16)$$

于是可取 $\lambda = \min\{\lambda_i\}$ 作为搜索步长。

2.3 降级复形

可行域为非凸时, 形心 X_c 可能不可行, 从而使迭代计算无法进行, 为此可用降级复形来处理, 使形心位置稍作挪动。具体做法是: ①找出 X_c 处违反约束条件最为严重的约束函数 $g_h(X)$; ②比较 $g_h(X_k)$, $k = 1, 2, \dots, p$, 去掉最劣约束函数值所对应的顶点, 如该顶点的目标函数值为最小, 则去掉次劣点, 形成少一个顶点的降级复形; ③求降级复形形心, 如仍不可行, 且顶点数 p 大于 $n+1$, 则重复①、②步, 直至可行为止; ④如复形顶点数降至 $n+1$, X_c 仍不可行, 则将原来顶点数 $p = 2n+1$ 的复形围绕好点作压缩处理。

2.4 后期搜索

应用实践表明, 复形法在迭代初期目标函数改善较快, 后期由于复形趋近约束边界而被压缩得很小, 使目标函数下降十分缓慢。为此从当前好点出发, 按梯度投影法^[2]生成搜索方向

$$D = -Q \nabla f(X), \quad (17)$$

式中 Q 为从设计空间到好点作用约束超平面交集上的投影矩阵

$$Q = I - N(N^T N)^{-1} N^T, \quad (18)$$

式中 I 为 $n \times n$ 单位阵, $N = [\nabla g_1, \nabla g_2, \dots, \nabla g_r]$, r 为线性独立的作用约束个数。而搜索步长仍按单调性

分析来确定。

3 工程应用实例

广州市某基坑开挖深度 9.0 m, 采用土钉支护结构设计方案, 支护工程于 2002 年 3 月份完工并交付使用。基坑北面长 85 m, 场地土层分布及其物理力学指标取值见表 1, 施工图设计剖面如图 1 所示。

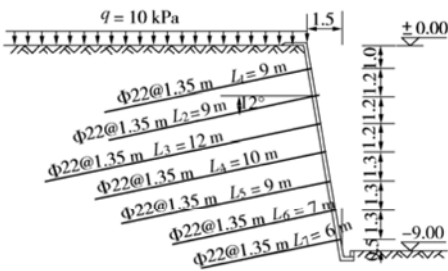


图 1 土钉支护剖面图

Fig. 1 Cross section of soil nailing structure

3.1 原始输入数据

(1) 模型参数: 根据现行有关规程以及工程实践经验, 事先确定优化模型中的各项参数。与目标函数有关的参数, 如 $p_c = 6000$ 元/ m^3 , $p_s = 5000$ 元/ t , $p_f = 100$ 元/ m^2 ; 与稳定约束条件有关的参数, 如 $[F_s] = 1.3 \gamma_0$, $[K_q] = 1.5 \gamma_0$, $[K_h] = 1.3 \gamma_0$, $[K_c] = 1.2 \gamma_0$, $[K_j] = 1.2 \gamma_0$, γ_0 为基坑边坡重要性系数, 安全等级一级、二级、三级分别取 1.1、1.0、0.9, 本工程 $\gamma_0 = 1.0$; 设计变量的上限值 $\bar{X} = [0.025 \text{ m}, 1.5 \text{ m}, 15^\circ, 0.150 \text{ m}, 12 \text{ m}, 12 \text{ m}, 12 \text{ m}, 12 \text{ m}, 12 \text{ m}, 10 \text{ m}, 10 \text{ m}]^T$, 下限值 $\underline{X} = [0.020 \text{ m}, 1.0 \text{ m}, 5^\circ, 0.090 \text{ m}, 8 \text{ m}, 8 \text{ m}, 8 \text{ m}, 8 \text{ m}, 8 \text{ m}, 6 \text{ m}, 6 \text{ m}]^T$ 。

(2) 初始设计方案: 根据以往工程经验拟定一个初始设计方案, 它必须满足约束条件式 (3) ~ (8), 即选择初始可行点

$$X^0 = [0.022, 1.3, 10, 0.110, 10, 12, 12, 10, 10, 8, 8]^T. \quad (19)$$

表 1 各土层物理力学指标

Table 1 Physicol-mechanical properties of soils

土层名称	土层厚度	容 重	粘聚力	内摩擦角	粘结强度	备 注
	h/m	$\gamma/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	c/kPa	$\varphi/(^\circ)$	τ_f/kPa	
人工填土	2.4	18.0	12.0	10.0	35.0	松散
粘性土	1.5	19.0	20.0	15.0	60.0	可塑
淤泥质土	1.1	17.2	8.0	8.0	25.0	软塑
残积粉质粘土	9.0	19.5	25.0	18.0	70.0	可塑
残积粉土	2.0	19.0	15.0	25.0	80.0	稍密~中密
强风化粉砂岩	2.0	21.0	80.0	28.0	120.0	半岩半土状

3.2 优化计算结果

采用土钉支护结构设计软件 SN2000 作优化计

算, 计算步骤如下: ①用户输入二个任意整数 N_1 、 N_2 , 有 $N_1 \leq N_2$, 并置 $i = N_1$; ②将 X^0 作为一个顶点, 再由程序根据不同 i 值随机生成其余各顶点而形成不同初始复形; ③按改进复形法进行迭代计算, 收敛得到一个局部最优解; ④若 $i < N_2$, 则置 $i+1 \rightarrow i$, 转第 2 步继续下一轮计算, 否则计算终止, 并将 $N_2 - N_1 + 1$ 轮计算中最小目标函数值所对应的局部最优解作为该问题最优解, 即最优设计方案。本工程取 $N_1=1$, $N_2=30$, 在 PC 微机上运行约 7 h 即可得到最优设计方案

$$X^* = [0.020, 1.3710, 12.2375, 0.090, 8.2608, 8.0059, 12, 10.2130, 8.3972, 6.6492, 6]^T$$
。(20)

表 2~4 给出了相应的优化计算结果。与初始设计方案 X^0 相比, 钢筋量减少 33.36%, 钻孔注浆量减少 46.55%, 单位支护面积的土钉长度减少 19.36%, 而工程综合单价则由 511.0943 元/m² 下降到 331.3503 元/m², 减少了 35.17%, 明显降低工程造价。整体稳定约束方面, 整体稳定安全系数比初始方案均有所下降, 其中-7.4 m 和-8.7 m 层开挖的内部整体稳定安全系数降到容许值, 而外部整体稳定约束则因下部土质情况较好均未能成为作用约束。

3.3 施工图设计方案

将最优设计方案 X^* 应用于实际工程时, 需事先根据具体情况作适当调整, 进行调整的主要原则是“保证安全, 方便施工”。如土钉钢筋直径 ϕ 和钻孔直径 d 实际均为离散型变量, 设计时应偏有利方向就近选取常规直径, 土钉长度 L_i 通常采用整数值以便于施工和节省钢筋用料, 水平间距 s 保留一位或二位小数以及土钉水平倾角 α 采用整数值则更符合工程习惯。施工图设计方案并不是唯一的, 因设计者的工程经验、个人偏爱以及施工条件等不同而异, 但都必须满足可行性条件式 (3)~(8)。本工程选取的施工图设计方案

为
$$X^e = [0.022, 1.35, 12, 0.090, 9, 9, 12, 10, 9, 7, 6]^T$$
 , (21)

如图 1 所示。同最优设计方案相比, 内部和外部整体稳定性均略有提高, 工程综合单价由最优设计方案的 331.3503 元/m² 升至 355.7483 元/m², 增加了 7.36%, 但与初始设计方案相比, 工程综合单价仍然减少 30.39%, 见表 2~4。

3.4 几个具体问题的处理

(1) 实际工程优化设计常遇到以下二种情况: 设计者不希望某设计变量参与寻优计算, 如土钉倾角 α 、钢筋直径 ϕ 或某层土钉长度等; 某些设计变量的界限约束条件总是成为作用约束, 如钻孔直径 d 的下限约束或某层土钉长度的界限约束等。为此程序 SN2000 设计了一个特殊功能, 允许用户任意选择式 (1) 中的若干个作为优化设计变量, 其余则取定值, 从而减少设计变量个数, 更好地提高优化效率。

(2) 由于目标函数和可行域的复杂性, 复形法迭代计算往往过早地收敛于某局部最优解, 而有时局部最优解与全局最优解之间甚至还有较大差距。为了使寻优过程得以继续进行, 笔者提出了一种“接力计算”的处理技术, 事实证明其效果是明显的。具体做法是: 将当前所求得的局部最优解作为初始点, 重新随机生成初始复形后开始下一次优化计算, 如此反复, 直至找不到下降可行点为止。

(3) 对于一个非线性程度较高的优化问题, 要获得全局最优解是十分困难的, 一般都是局部最优解。复形法即使采用了“接力计算”处理技术也会因不同的初始复形一般得到不同的局部最优解, 为了获得较好的局部最优解, 通常的做法是选取多个不同初始复形分别进行计算而从中择优, 为此专门设计一个子程序自动随机生成不同的初始复形。

表 2 目标函数计算结果

Table 2 Results of objective function

计算点	钢筋 $W/(10^3 \cdot \text{t} \cdot \text{m}^2)$	钻孔注浆 $V/(10^3 \cdot \text{m}^3 \cdot \text{m}^2)$	土钉长度 $L/(\text{m} \cdot \text{m}^2)$	综合单价 $f/(\text{元} \cdot \text{m}^2)$
X^0	17.6103	53.8405	5.9015	511.0943
X^*	11.7358	28.7785	4.7587	331.3503
X^e	15.0200	30.1080	5.0335	355.7483

表 3 内部整体稳定安全系数计算结果

Table 3 Safety factors of internal stability

计算点	分层开挖面标高/m							
	-1.2	-2.4	-3.6	-4.8	-6.1	-7.4	-8.7	-9.0
X^0	1.5104	1.7089	1.7826	1.5782	1.4706	1.4437	1.3932	1.4777
X^*	1.5104	1.4594	1.6092	1.3621	1.3045	1.3000	1.3000	1.3224
X^e	1.5104	1.5308	1.6837	1.4002	1.3296	1.3217	1.3304	1.3557

表 4 外部整体稳定安全系数计算结果

Table 4 Safety factors of external stability

计算点	K_q	K_h	K_c	K_j
X^0	6.8540	2.0046	1.9091	1.3302
X^*	5.0795	1.7027	1.7020	1.2867
X^e	5.4738	1.7738	1.7577	1.2905

4 模型参数的影响分析

优化设计模型中含有一些需事先给定的参数,如目标函数中的 p_c , p_s 和 p_f , 以及约束条件中的各种容许限值等, 这些参数通常均为人为指定, 并且在一定范围内是可变的, 研究这些参数变化对优化问题的影响具有实际指导意义。现根据以上工程实例, 着重研究 p_c , p_s , p_f 及 $[F_s]$, ϕ , d 等 6 个模型参数的影响, 首先选取一组初始值如 $[6000, 5000, 100, 1.3, 0.02, 0.09]^T$, 然后改变其中某一参数取值而其它参数保持不变, 依次进行优化计算, 可得到最优解 X^* 以及其它一些相关指标如单位支护面积的土钉长度 L^* 、钢筋量 W^* 、钻孔注浆量 V^* 、工程综合单价 f^* 等。图 2, 3 分别为 L^* , f^* 与各参数变化比例的关系曲线。现将优化计算结果归纳如下:

(1) 当 $p_c/6000$ 、 $p_s/5000$ 或 $p_f/100$ 分别在 0.8~1.2 范围内变化时, 最优解 X^* 保持式 (20) 不变, 又由于单位支护面积的土钉长度 $L = \frac{\sum L_i}{s \cdot b}$ 、钢筋量 $W = \frac{\pi}{4} L \rho_s \phi^2$ 以及钻孔注浆量 $V = \frac{\pi}{4} L (d^2 - \phi^2)$, 所以 L^* 、 W^* 、 V^* 亦保持不变, 而 f^* 则分别随着 p_c , p_s 或 p_f 的增大而线性增大。约束条件方面, -7.4 m 和 -8.7 m 层开挖的内部整体稳定约束、 ϕ 和 d 的下限约束总是成为作用约束。

(2) 当 $[F_s]/1.3 = 0.95 \sim 1.05$, 即 $[F_s] = 1.235 \sim 1.365$ 时, 最优解 X^* 随着安全系数容许值 $[F_s]$ 的变化而改变, L^* , W^* , V^* 及 f^* 分别随着 $[F_s]$ 的增大而增大。约束条件方面, ϕ 和 d 的下限约束总是成为作用约束, -6.1 m、-7.4 m 及 -8.7 m 层开挖的内部整体稳定约束中有一个或二个成为作用约束。本工程 $[F_s]$ 每增加 5%, 则 L^* 增加约 12%~15%, f^* 增加约 8%~11%。由于 $[F_s]$ 取值主要与支护工程安全等级有关, 故安全等级确定对设计方案及工程造价影响很大。

(3) 当 $\phi/0.02=0.9 \sim 1.1$, 即 $\phi=0.018 \sim 0.022$ m 时, d 的下限约束总是成为作用约束, 而 -6.1 m、-7.4 m 及 -8.7 m 层开挖的内部整体稳定约束中有二个或三个成为作用约束。当 $\phi \geq 0.020$ m 时, ϕ 的下限约束总是成为作用约束, 最优解 X^* 随着 ϕ 的变化而改变, L^* 、 V^* 分别随着 ϕ 的增大而略有减小, 而 W^* , f^* 则分别随着 ϕ 的增大而增大; 当 $\phi < 0.020$ m 时, ϕ 的

下限约束不能成为作用约束, 优化计算结果总有 $\phi^* \approx 0.020$ m, 最优解 X^* 以及 L^* , W^* , V^* , f^* 等随 ϕ 的变化甚微。可见, 对于本工程而言, 土钉钢筋直径不应小于 0.020 m。

(4) 当 $d/0.09 = 0.8 \sim 1.2$, 即 $d = 0.072 \sim 0.108$ m 时, 最优解 X^* 随着 d 的变化而改变, L^* , W^* 分别随着 d 的增大而减小, 而 V^* , f^* 则分别随着 d 的增大而增大。约束条件方面, ϕ 和 d 的下限约束总是成为作用约束, -6.1 m、-7.4 m 及 -8.7 m 层开挖的内部整体稳定约束中有一个或二个成为作用约束。由此可见, 在实际工程中可结合施工机具选择尽可能小的钻孔直径进行土钉支护结构设计, 是降低工程造价的一个有效途径。

对于约束条件中的其它容许限值, 可用以上同样方法予以研究, 在此不一一叙述。总之, 在寻优过程中一旦发现某容许限值使相应的约束条件成为作用约束, 研究其取值变化对优化问题的影响是十分必要的。

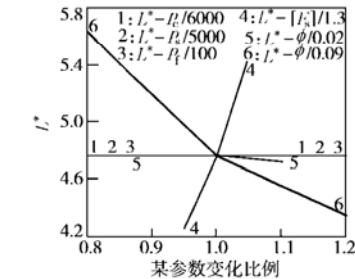


图 2 L^* 与模型参数的关系曲线

Fig. 2 L^* vs. model parameters

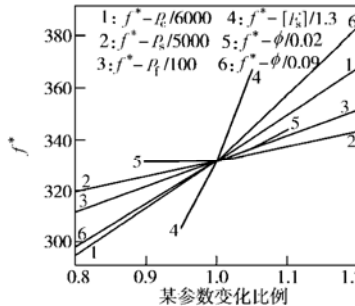


图 3 f^* 与模型参数的关系曲线

Fig. 3 f^* vs. model parameters

5 结 论

(1) 工程实践证明, 本文提出的优化设计模型能很好地符合实际工程要求, 解决了土钉支护结构优化

设计问题, 是一个较为完善的实用优化模型。

(2) 模型参数 p_c 、 p_s 和 p_t 的变化只影响工程综合单价, 对最优解并无影响, 就工程优化设计而言, 这些参数的取值误差并不重要; 约束条件中的安全系数容许值 $[F_s]$ 、设计变量下限值 ϕ 和 d 的取值对优化问题的影响甚大, 而其它容许限值一般影响不大。

(3) 采用复形法求解土钉支护结构优化问题是合适的, 在此基础上引进了多项改进措施, 使得该算法具有更高的寻优效率。如同其它复杂优化问题一样, 想获得全局最优解并非易事, 但作为实际工程应用却很容易从中得到一些较为经济可靠的施工图设计方案。

(4) 在保证土钉支护结构具有足够稳定性的条件下, 减小土钉钢筋直径 ϕ 和钻孔直径 d 对降低工程造价效果显著, 设计应予以优先考虑。

(5) 优化模型中未考虑工作面开挖的抗坍塌稳定性条件, 故尚应按文献[6]方法对最优设计方案或施工图设计方案进行验算。如得不到满足, 那么设计方面应考虑减小边坡倾角、降低坑外地下水位、采取超前加固或者增加土钉层数以减小开挖高度等, 同时施工方面应采取切实有效的防坍塌工程措施^[6]。

致谢: 浙江大学汪树玉教授、刘国华教授对本文工作提出宝贵意见和建议, 在此特表深切感谢!

参考文献:

- [1] 彭明祥, 何正勇, 杨晓弘. 土钉支护结构实用计算方法[J]. 建筑结构, 2003(5): 49 - 51. (PENG Ming-xiang, HE Zheng-yong, YANG Xiao-hong. Practical calculation method for soil nailing structure[J]. Building Structure, 2003(5): 49 - 51.)
- [2] 汪树玉, 杨德铨, 刘国华, 等. 优化原理、方法与工程应用[M]. 浙江: 浙江大学出版社, 1991. (WANG Shu-yu, YANG De-quan, LIU Guo-hua, et al. Optimization theory, method and application [M]. Zhejiang: Zhejiang University Press, 1991.)
- [3] CECS96—97 基坑土钉支护技术规程[S]. (CECS96—97 Specification for soil nailing in foundation excavations [S].)
- [4] GJB 02—98 广州地区建筑基坑支护技术规定[S]. (GJB 02—98 Technical specification for retaining and protection of building foundation excavations in Guangzhou area [S].)
- [5] 彭明祥. 土钉支护设计参数的灵敏度分析[J]. 工程勘察, 2003(6): 8 - 10. (PENG Ming-xiang. Analysis on sensitivity of design parameters for soil nailing[J]. Geotechnical Investigation and Surveying, 2003(6): 8 - 10.)
- [6] 彭明祥, 罗兴成, 莫赐国. 土钉支护工作面开挖的稳定性研究[J]. 建筑结构, 2004(12): 42 - 44. (PENG Ming-xiang, LUO Xing-cheng, MO Ci-guo. Study on stability of soil nailing work surface excavation[J]. Building Structure, 2004(12): 42 - 44.)

《中国学术期刊文摘》中文版和英文版 2007 年征订启事

《中国学术期刊文摘》分中文版(简称 CSAC)和英文版(简称 CSAE)两种, 各自收录了我国高水平学术期刊中基础科学、医学、农业科学和工程技术领域约 40 个学科的论文文摘, 全景展现我国的科研成果与进展。

作为综合性科技类检索刊物, 《中国学术期刊文摘》致力于将我国科学技术各领域的原创性学术成果全面、快速地向科技工作者交流、传播, 其中 CSAE 是我国第一份综合性英文版科技类学术检索刊物。

《中国学术期刊文摘》由中国科学技术协会主管, 科技导报社主办并负责编辑、出版、发行, 对科研单位、高等院校、图书馆以及广大科技工作者检索和了解我国的科技研究成果、学术研究动向具有重要的参考价值。

《中国学术期刊文摘(中文版)》刊号为 CN 11-3501/N,

ISSN 1005-8923, 2007 年为半月刊, 大 16 开, 国内定价 38.00 元/册, 全年定价 912 元, 邮发代号: 82-707。

《中国学术期刊文摘(英文版)》刊号为 CN 11-5411/N, ISSN 1673-4084, 2007 年改为月刊, 大 16 开, 国内定价 15.00 元/册, 全年定价 180 元, 邮发代号: 80-487。

欢迎广大科技工作者、科研单位、高等院校、图书馆订阅。

通讯地址: 北京市海淀区学院南路 86 号科技导报社(邮编 100081); 联系电话: 010-62103122; 联系人: 姚玉琴; E-mail: yaoyuqin@cast.org.cn; 单位主页: <http://www.csac.org.cn>; 户名: 科技导报社; 账号: 0200001409089017271; 开户银行: 工商银行百万庄支行。

(《中国学术期刊文摘》编辑部 供稿)